

Lesz-e „egzakt” biológia?

A matematika, a geometria annak köszönheti szépségét, hogy egész bonyolult világa néhány alapfogalomból, alaptételből kiindulva, tiszta logika segítségével felépíthető. Igaz, csak maga a logika nem lenne elég a bonyolultabb eseteknek közvetlenül az alapfogalmakból történő levezetéséhez; ehhez szükségessé vált a formalizmusok, az egyenletek bevezetése is, a hozzájuk tartozó műveleti szabályokkal.

A mechanika, az elektromosságtan, a kémia akkor vált egzakt tudománnyá, amikor sikerült definiálni alapfogalmait, alapvető összefüggéseit, majd ezekre megfelelő, a szerveződés adott szintjére jellemző formalizmust és műveleti szabályokat felállítani. Ez tette ugyanis lehetővé az események szükséges pontosságú mennyiségi leírását, a mennyiségi és minőségi változások megjósolását. E leírások alapjai a mérlegegyenletek — a kémiában ezeket sztöchiometriai egyenleteknek nevezik —, amelyek megmondják, hogy ha az események végbemennek, akkor miből mi és mennyiből mennyi keletkezik. A mérlegegyenletek nem adnak felvilágosítást arra, hogy a folyamatok az idő függvényében hogyan zajlanak, erre a kinetikai egyenletek képesek. Ám a kinetikai egyenletek a mérlegegyenleteken alapulnak, mérlegegyenletek nélkül kinetikai leírás sem lehetséges. A mérlegegyenletek egyszerűek, csak elemi matematikai műveleteket igényelnek, a kinetikai egyenletek bonyolultabbak, differenciálegyenlet-rendszereik sokszor csak közelítő módszerekkel oldhatók meg.

Vajon lehetséges-e az élővilág jelenségeit a mechanikához, az elektromosságtanhoz, a kémiához hasonló egzakt módszerekkel leírni? Lehet-e az élet mibenlétét egyenletekkel kifejezni? Lehetséges-e a biológia tudományát néhány alapfogalomból és alapvető összefüggésből logikai úton felépíteni? Ki lehet-e fejleszteni olyan formalizmust és műveleti szabályokat, amely ennek mennyiségi és minőségi leírását lehetővé teszi?

Ezek ma már korántsem elvont, absztrakt kérdések. A mindennapos gyakorlat a gyógyítástól a környezetvédelemig, az állat- és növényneveléstől a kártevők elleni küzdelemig mindenütt szembetalálja magát azzal a ténnyel, hogy nem tudja az adott szintű biológiai rendszernek mint egésznek a válaszát sem mennyiségileg, sem minőségileg megjósolni.

Persze nem lehet tagadni azokat a ragyogó eredményeket, amelyeket a biológia és a „molekuláris” biológia az utóbbi évtizedekben elért. Csakhogy ez utóbbi részfolyamatokkal foglalkozik, s — egy hasonlattal élve — attól, hogy egy rádióban az összes tranzistor, kondenzátor, ellenállás stb. működését ismerjük, még nem tudjuk, hogyan működik a rádió. A „nem molekuláris” biológia viszont az élőlények hárommilliárd éves evolúciója során kialakult, rendkívüli tökéletességű és bonyolultságú rendszereit vizsgálja, s ez ahhoz hasonlítható, mintha valaki a houstoni űrközpont tanulmányozásával akarná kideríteni, mi is a rádió elve. Az „élet titka” pedig valahol a kettő között van elrejtve, az olyan rendszerek működésében, amelyek már nem „alkatrészek” csupán, de nem is olyan fejlettek, mint ami a létért való hárommilliárd éves küzdelemben a fennmaradáshoz szükséges. A rádió elve legtisztábbra a detektoros rádiónál, az elektromotoré az elektromos erőterben elforduló dróthuroknál ismerhető fel.

Hogyan lehet eljutni a biológia legegyszerűbb rendszereihez, azokhoz, amelyek már élnek, de semmi „főlétséget” nem tartalmaznak, azaz semmi olyant, ami nem magához az élethez, hanem az evolúció adott szintjén a fennmaradáshoz szükséges? Meg lehet-e találni azt a minimálrendszert, amely még rendelkezik az életre jellemző összes általános sajátossággal, tehát élőnek tekinthető, de amelyből már semmit sem lehet elvenni anélkül, hogy megszűnne élő lenni? Meg lehet-e találni azt a legegyszerűbb rendszert, amelyből az élet lényege, alapelve, az élet princípiuma közvetlenül leolvasható, és esetleg egyenletekkel is leírható?

Elvileg két út is járható. Az egyik, hogy valamely valóságos mai élőlényből — mondjuk egy baktériumból — kezdjük elvileg elvenni mindazon részeket, mechanizmusokat, amelyek elvétele még nem vonja maga után a baktérium pusztulását (természetesen biztosítva számára az optimális feltételeket). Ez az út a nehezebben járható, elsősorban a belénk ivódott biológiai szemléletmódunk miatt. — A másik út, hogy kémiai reakciókat szervezünk rendszereibe, olyan rendszerekbe, amelyek az élőlények sokféle tulajdonságának egyikét-másikat mutatják, majd az így kapott különféle kémiai rendszerekből mint elemekből működésük összekapcsos-

lásával kémiai szuperrendszereket szervezünk. Ezek részben mutatják az őket alkotó kémiai rendszerek tulajdonságait, részben pedig — szerveződési módjuktól függően különböző — új minőségi tulajdonságokat is mutatnak. Ha jól megválasztott kémiai rendszerekből indulunk ki, és megfelelő módon szervezzük szuperrendszerre, olyan rendszereket is nyerhetünk, amelyek az élő rendszerek összes általános tulajdonságával rendelkeznek. Ezt az utat vizsgáljuk meg kissé részletesebben.

Az élő rendszerek egyik legáltalánosabb sajátossága, hogy anyagcseréje folyamán a tápanyagokat kémiai reakciók segítségével anyagcseretermékeké alakítja úgy, hogy önmaga a kémiai reakció során nem fogy el. De erre a kémiában a katalizátorok, vagy inkább mondjuk úgy, hogy a katalitikus tulajdonságú kémiai rendszerek is képesek. (Ezek lehetnek nagyon bonyolult, nagyszámú elemi reakciót magukban foglaló reakcióhálózatok is.) Kimutatható, hogy a katalitikus sajátosság homogén katalízisnél az elemi reakciók speciális szerveződési módjából ered.

Az élő rendszerek nemcsak átalakítják a tápanyagokat, hanem az átalakítást saját maguk gyarapítására is felhasználják. De a kémiában is ismeretesek ilyenek: az autokatalitikus rendszerek, ahol a nyersanyag átalakítása során nemcsak a végtermék termelődik, hanem a katalizátor is, főlegben. Az ilyen rendszerekben tehát egyre több a katalizátor mennyisége, ezáltal egyre gyorsabb a reakció, a gyorsabb reakció gyorsabban termeli a katalizátort, ez még jobban gyorsítja a reakciót — és így tovább. Félix Le Dantec francia filozófus a századfordulón



egyenlettel jellemezte az élőlényeket, ahol X a tápanyag, Y a salakanyag, A az „élő” anyag. Ez az egyenlet éppen az autokatalizátor stöchiometriai bruttóegyenlete.

Az élő rendszerekben a folyamatok a belső „biológiai óra” által meghatározott periodicitással mennek végbe. Az élő rendszerekben tehát időmérő „szerkezetek” találhatóak. De léteznek olyan kémiai rendszerek — az újabban igen divatosá vált oszcilláló reakciók —, amelyek időben pontos periodicitással változtatják tulajdonságaikat. Ha például ilyen rendszerbe megfelelő indikátort teszünk, akkor az oldat megkékül, bizonyos idő után sárga lesz, aztán megint kék, majd megint sárga stb. Azt mondhatnánk, hogy mintegy „ketyeg” az oldat, meghatározott periódussal mérve az időt, s ebben az sem zavarja, ha az oldatot közben kevergetjük. A periódusidők a koncentrációk és a hőmérséklet változtatásával néhány másodperc és néhány nap között változtathatók. Az oszcilláló kémiai rendszerekben az egyes elemi reakciólépések bonyolult hálózatba kapcsolódnak, s e hálózat organizációs módjából ered az oszcilláló tulajdonság.

Az élő rendszerek programvezérelt rendszerek. A programvezérléshez program kell, a programhoz információátvitel, sőt az élő rendszereknél még az információ sokszorosítása is, hogy az utódok is rendelkezzenek a szülőkre jellemző információkkal. Kémiai rendszerben is megvalósítható az információátvitel és átadás (replikálása). Az úgynevezett templát polimerizációs folyamatok képesek erre, ahol a mintamolekula felületén és annak mintájára történik az új makromolekula szintézise. Így szintetizálódik az élő szerkezetekben az örökítő anyag, a DNS, de ismeretes nem biológiai jellegű templát polimerizációs folyamat is.

Ilyen és hasonló kémiai rendszerek egy-egy biológiai fontosságú tulajdonságot hordoznak tehát, és e tulajdonságok függetlenek attól, hogy az adott kémiai rendszerben milyen konkrét reakciók találhatók; csak attól függnek, hogy a reakciók milyen organizáció szerint kapcsolódnak egymáshoz. Hasonló ez ahhoz, mint amikor az elektrotechnikában egy tekercsből és egy kondenzátorból rezgőkört készítünk, amely képes rezonálni egy másik rezgőkör működésére, noha alkatrészei külön-külön vagy akár együtt, de más módon összekapcsolva nem képesek erre. Így lesz egy acélmembránból meg egy elektromágnesből fülhallgató, egy drótból és egy galenitkristályból egyenirányító. Mindegyik egy-egy alkatrészből összeállított elektrotechnikai rendszer.

Ha most ezt a három elektrotechnikai rendszert, a rezgőkört, az egyenirányítót és a fülhallgatót megfelelő módon összekapcsoljuk úgy, hogy működésük kölcsönösen egymás függvényévé válják, egy elektrotechnikai „szuperrendszert” (elektrotechnikai rendszerekből összerakott rendszert) kapunk: a rádiót.

Analóg módon, kémiai rendszereket megfelelően összekapcsolva különféle kémiai szuperrendszereket nyerhetünk, amelyek közül az egyik — amelyikben egy autokatalitikus reakcióhálózat kapcsolódik működésében egy templát polimerizációs és egy membránképződéses folyamathoz — olyan szuperrendszert alkot, amely kielégíti az élő rendszerek kritériumait, tehát élő rendszernek tekinthető. Minthogy ebből a rendszerből semmit nem lehet már elvenni anélkül, hogy élőre jellemző

tulajdonságait el ne veszítse, így biológiai minimálrendszernek kell tekinteni. Ezt a rendszert, amely kémiai oldalról tekintve szuperrendszer, biológiai oldalról minimálrendszer, *chemoton*nak neveztem el.

A chemotonelmélet alap gondolata — amelyet ma úgy fogalmazzunk meg, hogy az életműködés alapelve egy önreprodukáló szabályozott és egy önreprodukáló információátviteli rendszer összekapcsolása önreprodukáló, szabályozott és programvezérelt szuperrendszerre — 1952-ben fogalmazódott meg, de csak 1971-ben került publikálásra (Gánti Tibor: *Az élet principiuma*. Bp., 1971). Az alap gondolat részletes kidolgozásához ugyanis a molekuláris biológia olyan eredményeire volt szükség, amelyek csak ebben a két évtizedben születtek meg. 1971 óta a chemoton-gondolat igen nagy fejlődésnek indult, s átfogó elméletté szélesedett.

Mindenekelőtt a kémiai sztöchiometriai egyenletek továbbfejlesztésével sikerült kidolgozni azt a formalizmust a műveleti utasításokkal, amely lehetővé tette a biológiai minimálrendszer működését leíró egzaktt mérlegegyenletek felállítását. A mérlegegyenletek megadják a rendszer működésének mennyiségi és minőségi összefüggéseit, belőlük egyszerűen megérthető az élő és az élettelen közötti minőségi különbség.

A mérlegegyenletek birtokában felállítottuk a chemotonok reakciókinetikai differenciálegyenleteit, amelyek lehetővé tették, hogy Békés Ferenc és Nagy Ákos kolégáimmal számítógépen szimuláljuk a chemotonok időbeli viselkedését. E szimulációs vizsgálatok megerősítették azt, hogy a chemotonok valóban élő rendszereként viselkednek: térben elhatárolt individuumok, amelyek a tápanyagot anyagcsere-termékek keletkezése közben szabályozott és programvezérelt módon saját anyagaik szintézisére használják, eközben növekednek, a növekedés következtében térbelileg elhatárolt egységekké osztódnak, vagyis szaporodnak, az információátviteli alrendszer önreprodukciója következtében az utódok azonos genetikai programmal rendelkeznek stb.

Kiderült e szimulációs vizsgálatokból, hogy a chemotonok — genetikai tulajdonságaik megtartása mellett — igen nagy mértékben képesek kompenzálni a környezetben végbement változásokat, vagyis egyedileg adaptálódnak a környezethez, s hogy az információs alrendszerben a másolásnál lehetséges hibák következtében előállított változatok között a bonyolultabb variációk az életképesebbek, vagyis hogy a chemotonok bizonyos „evolúciós húzóerővel” rendelkeznek, amely a generációk sokaságán keresztül az egyre összetettebb rendszerek megjelenését, az evolúciót eredményezi.

Ha a chemotonok valóban biológiai minimálrendszerek, akkor várható, hogy belőlük az élővilág logikai úton levezethető legyen; s minthogy a chemotonok egzaktt egyenletekkel leírhatók, várható, hogy az élővilág mennyiségi-minőségi összefüggései is egzaktt egyenletekkel leírhatók legyenek. Legalábbis elvileg, hiszen az élővilág végtelen változatosságának tényleges leírása ugyanúgy lehetetlen, mint a tényleges egyedi kristályok összességének egzaktt leírása. Am ahogy a szimmetriaviszonyok ismeretében elvileg megadhatók a lehetséges kristálytani elemi cellák, s ezekből a tetszőleges tényleges kristály méretarányai, optikai, röntgendiffrakciós stb. tulajdonságai egzakttul levezethetők, a biológiában is hasonlótt kell várni: a minimálrendszerből egzaktt módon származtatott általános törvényeket, amelyek segítségével a tetszőleges élőlény működése a szükséges pontossággal mennyiségileg és minőségileg megadható.

Az elmúlt két-három esztendőben ígéretes előrehaladást sikerült tenni ebben az irányban. Sikerült a chemotonokból levezetni számos ismert és néhány ismeretlen alapvető genetikai összefüggést. Nagyon egyértelmű és világos magyarázatot ad a chemotonelmélet az élet keletkezésére, arra, hogy miképpen alakult ki a kémiai evolúció során keletkezett szerves vegyületek halmazából az önreprodukáló programvezérelt kémiai rendszerek — vagyis az élővé válás folyamatára. Igen világossá tették a szimulációs vizsgálatok a genotípus—fenotípus összefüggés elvi hátterét (hogy genetikailag csak a *lehetőség* a programozott, és hogy a környezeti hatások ezt mennyiségileg és minőségileg hogyan befolyásolják). Ígéretesen előrehaladtunk az enzimes szabályozás — evolúció során történő — megjelenésének magyarázatában, valamint az eukarióta sejtek kialakulásának az endoszimbionta teóriával összhangban levő, de azon túlmutató magyarázatában, beleértve az endoszimbiózist, a sejtalkotórészek összeműködésének egzaktt egyenletekkel történő leírását is, bár ezeket a vizsgálatokat korántsem fejeztük még be. Végül a chemotonelmélet alapján fel lehetett vázolni az élő rendszerek mesterséges előállításához szükséges stratégia alapjait is.

Mindezekhez számos kapcsolódó terület feldolgozása vált szükségessé: például mindenekelőtt igen alaposan fel kellett dolgozni az életjelenségeket, felállítani

és definiálni az életkritériumokat úgy, hogy azok a molekuláris biológia eredményeit is magukban foglalják. Ki kellett dolgozni a kémiai körfolyamatok és hálózatok bruttó-sztöchiometriáját. Rendszerelméleti szempontból alaposan meg kellett érteni az élővilág rendszereinek hierarchiáját stb. Mindezek egyben a biológián túlmutató, más területekhez kapcsolódó új felismeréseket is eredményeztek, mint amilyen például az úgynevezett lágy (oldott állapotban működő) automaták, sőt önreprodukáló lágy automaták szerveződési és működési alapelvei.

Eppen a sokirányú és maguktól kínálkozó eredmények azok, amelyek arra készítetnek bennünket, hogy azt higgyük: talán ezen az alapon el lehet jutni egy egzakt, azaz az összefüggéseket minőségileg és mennyiségileg egyaránt leírni képes elméleti biológiához. Hogy hitünk igaznak bizonyul-e, erre természetesen csak az idő adhatja meg a választ.

IOAN NOJA

A LÁTHATATLAN

A láthatatlan, mint edények öble,
követ házam egeről, szüntelen a nyomomban,
lélegzetét érzem, amint körözve
szálldos a fényben, mely lassan kilobban;

a láthatatlan, érzem, kerékbe tör, szeretnék
nevet adni neki, hogy megragadjam,
de csak elemi kin és erőlködés, verejték,
mint a világ kezdete hajdan;

a láthatatlan négy falam, szobám
esténként mindig eltolja nyugatra,
s ha elrontom, esendben emeli rám
tenyerét, és az élet vonalát felmutatja.

TÁRSATLAN TENGERÉSZEK

A távolban talán sasok lebegnek
láthatatlan kötelen, messzelátó-csővön,
az éhes úr foga fenn, ideleenn meg
a csapda, a vad óceán-özön,

rohannak a platina-sisakos
habok, megtörtént dolgokat sodorva,
titkos drámákat, haragot, a sós
algakat egybefontan hatalmas síresokorba;

elkorhadnak idővel a hajók
az aggságtól, a sok sóslé-marástól,
a láthatár mögöttük nem ragyog,
mindennap egyre ködösebb a távol,

a víz felszínén meggyűl a salak,
fogy, fogy a nap, nyúlnak az éji órák —
társatlan tengerészek imádkoznak, s a vak
világot káromolják.

VERESS ZOLTÁN fordításai